

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Analýza akustických vlastností zvukově izolační pěny

Analysis of acoustic properties of sound absorbing foams

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

David Tomešek

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Analýza akustických vlastností zvukově izolační pěny
Analysis of Acoustic Properties of Sound Absorbing Foam

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor základní problematiky snižování hluku
3. Proved'te analýzu vybraných vzorků zvukově izolačních materiálů
4. Provedené analýzy a základní měření vyhodnoťte
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- Rayleigh, J. W. S. The Theory of Sound, New York: Dover, 1894, ISBN 0-8446-3028-4
- Wilson, Ch. E., Noise Control(Revised ed.), Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 2006, ISBN 1-57524-237-0
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

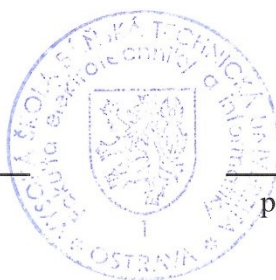
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi ochotně poskytli odbornou pomoc, cenné rady a navedli mne správným směrem k vypracování bakalářské práce. Jmenovitě patří díky panu Ing. Viktorovi Pokornému, Ing. Michalovi Weiszovi, Ing. Petrovi Kačorovi Ph.D. Za pomoc a umožnění měření děkuji RNDr. Anně Ryndové, Ph.D. z VUT Brno a v neposlední řadě také panu Alexandru Fryčovi, za poskytnutí analyzovaných materiálů.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Měření jsem vypracoval samostatně bez zamlčení nekorektních údajů.

V Ostravě dne 29. 4. 2013

David Tomešek:.....

Abstrakt:

Tato práce se věnuje analýze akustických vlastností zvukově absorpčních polyuretanových pěn. Zkoumá vliv druhu pěny a její povrchové úpravy. V části věnované měření byl měřen koeficient zvukové pohltivosti.

Práce je jak teoretického tak i praktického charakteru, v teoretické části je věnováno vysvětlení vnímání hluku, hluk v okolním prostředí dále vysvětlení akustických veličin a akustikou obecně. Praktická část je doplněna vysvětlením způsobu měření

Cílem této práce je shrnout základní vlastnosti těchto pěn, a navrhnout doporučené využití v technické praxi.

Klíčová slova:

koeficient zvukové pohltivosti, koeficient zvukové odrazivosti, akustická pěna, akustický tlak, akustika, zvuk, hluk, zvukové absorbéry, akustická měření, akustická absorpce,

Abstract:

This work is devoted to the analysis of acoustic properties of sound-absorbing polyurethane foams. It examines the influence of the type of foam and the surface finish. In the part devoted of measurement were sound absorption coefficient is measured.

The work is both theoretical and practical nature, the theoretical part is devoted to the explanation of the perception of noise, ambient noise also explanation acoustic variables and the acoustics in general. The practical part also includes an explanation of measurements.

The objective of this work is to summarize the basic properties of these foams, and suggest recommended use in practice.

Key words:

Coefficient of sound absorption, coefficient of sound reflectivity, acoustic foam, acoustic pressure, acoustics, sound, noise, sound absorbers, acoustic measurements, acoustic absorption,

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
α	-	koeficient zvukové pohltivosti
c	m.s^{-1}	rychlost zvuku v daném prostředí
c_0	m.s^{-1}	rychlost zvuku ve vzduchu
T	s	perioda
f	Hz	frekvence
λ	m	vlnová délka
a_e	m.s^{-2}	zrychlení vibrací
L_a	dB	Hladina zrychlení vibrací
p	Pa	akustický tlak
p_0	Pa	tlak na prahu slyšení
I	W.m^{-2}	intenzita zvuku
Z	N.s.m^{-3}	měrná akustická impedance
G	Pa	modul pružnosti ve smyku
E	Pa	modul pružnosti v tahu
ρ	kg.m^{-3}	hustota prostředí
K	Pa	modul objemové pružnosti
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	teplota
κ	-	poissonova konstanta
v	m.s^{-1}	rychlost
ω	rad.s^{-1}	kruhová frekvence
A	m	amplituda výchylky
t	s	čas
x	m	okamžitá výchylka
W	J	energie zvukových vln
S	m^2	plocha
P	W	akustický výkon
L_i	dB	hladina intenzity

L_p	dB	hladina akustického tlaku
I_0	$W.m^{-2}$	referenční hodnota intenzity zvuku na prahu slyšení
Λ	Ph	hladina hlasitosti
Z_a	$N.s.m^{-3}$	akustická impedance
W_p	J	pohlcovaná zvuková energie
W_d	J	celková dopadající zvuková energie
W_0	J	odražená zvuková energie
r_s	Pa	měrný stejnosměrný akustický odpor
χ	-	činitel struktury
σ	-	činitel poréznosti
l	m	délka
d	m	průměr
h	m	tloušťka materiálu

Obsah

Úvod:	1
Teoretická část	2
1 Akustika	3
1.1 Zvuk a hluk:	3
1.2 Člověk a zvuk	5
1.2.1 Jak a čím vnímáme zvuk	5
1.2.2 Práh slyšení	7
1.2.3 Oblast slyšení (sluchové pole)	7
1.3 Vliv hluku na člověka	8
1.3.1 Příklady hlukových hladin vyskytující se v běžném životě	10
1.4 Pojmy a veličiny v akustice	10
1.4.1 Akustický tlak; p [Pa]	10
1.4.2 Rychlost šíření zvukového vlnění; c [m.s^{-1}]	11
1.4.3 Vlnová délka; λ [m]	12
1.4.4 Akustická rychlost; v [m.s^{-1}]	12
1.4.5 Akustický výkon zdroje zvuku; P [W]	13
1.4.6 Intenzita zvuku; I [W/m^2]	13
1.4.7 Hladina intenzity; L_I [dB] a hladina akustického tlaku; L_p [dB]	14
1.4.8 Hladina hlasitosti; Λ [Ph] a křivky stejné hlasitosti	15
1.4.9 Hladina akustického tlaku; A L_A [dB]	15
1.4.10 Akustická impedance; Z_a [N.s.m^{-3}]	16
1.4.11 Měrná akustická impedance prostředí; Z [N.s.m^{-3}]	16
1.4.12 Akustické spektrum	16
1.4.13 Oktávová a třetin-oktávová pásma	17
1.5 Pohlcování zvuku	17
1.5.1 Způsoby redukce hluku:[5]	18
1.5.2 Mechanika pohlcování	18
1.5.3 Činitel akustické pohltivosti; α [-]	20
1.6 Porézní materiály	20

Praktická část	22
2 Měření zvukové neprůzvučnosti dle normy ČSN ISO 10534-1 – určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny	23
2.1 Princip měření:	23
2.2 Měřicí zařízení:	24
2.3 Impedanční trubice:	24
2.4 Vlastní měření	27
2.5 Naměřené hodnoty	28
2.5.1 Pěna – „panel“ tl. 9cm hořlavé + samozhášivé provedení	29
2.5.2 Pěna – „sinus“ tl. 3cm hořlavé + samozhášivé provedení	30
2.5.3 Grafické srovnání všech měřených profilů	31
Závěr	32
Seznam použité literatury	33
Seznam použitých obrázků	34
Seznam tabulek	35
Seznam příloh:	36
Přílohy	I
Příloha A	II
Fotografie jednotlivých akustických pěn	III

Úvod:

Různé zvuky nás obklopují celý náš život. Některé mohou působit příjemně a jiné mohou působit rušivě a vyvolávají nepříjemné pocity. Jakýkoliv zvuk, který našemu uchu nelahodí, je nazýván hlukem. Nejběžnějšími hluky, které nás obklopují, jsou ruchy silnic, železnic, stavební, v průmyslovém prostředí, ale také i hluky vyvolané v domácnostech.

Vědní obor, který se zabývá zkoumáním zvukových jevů hlediska ochrany člověka před hlukem, se nazývá akustika. Akustika patří mezi základní obory fyziky a je velmi obsáhlá. Dělí se podle zaměření na urbanistickou, stavební akustiku, a prostorovou akustiku. Prostorová akustika se zabývá, jak již název napovídá, optimální akustikou v prostoru.

Jelikož nás nadměrný hluk neobklopoval odjakživa, ale až s příchodem průmyslové revoluce V 18. století, nestihl si za tak krátkou dobu člověk vypěstovat účinnou přirozenou ochranu před nadměrným impulsním hlukem, zejména před hlukem, který můžeme očekávat. A právě proto je důležité chránit svůj sluch a k tomu nám pomáhají speciální materiály, které snižují dobu dozvuku v uzavřených místnostech a tím účinně snižují hladinu akustického tlaku. Jedním ze způsobů jsou materiály na bázi polyuretanových pěn s otevřenými póry. Tyto pěny lze využít všude tam, kde jsme vystaveni nadměrné hladině hluku, ať už strojními zařízeními, nebo jinými zdroji hluku. Při návrhu jednotlivých řešení snižujících hluk v uzavřených prostorech je nutnost znát o materiálu míru jeho schopnosti absorpce zvuku.

Teoretická část

1 Akustika

Je obor fyziky, který se zabývá fyzikálními kmity, vznikem zvukového vlnění a jeho šíření.

1.1 Zvuk a hluk:

Zvuk představuje z fyzikálního hlediska kmitavý pohyb malých částí pružného prostředí (pevné, plynné, kapalné), šířící se mechanickým vlněním v oblasti slyšitelných kmitočtů – tj. zhruba mezi 16Hz až 20kHz. Toto vlnění můžeme vnímat svým sluchem. Od svého zdroje se může zvuk šířit jen v uvedených prostředích. Ve vakuu se zvuk šířit nemůže. Zvuk zprostředkovává informace o okolním světě. Celý tento děj přenosu informací si můžeme představit jako přenosovou soustavu, která má tři základní části:

- Zdroj zvuku – např.: reproduktor
- Prostředí, kterým se zvuk šíří
- Příjemce zvuku, kterým je člověk a jeho sluch

Základní fyzikální parametry, které popisují zvuk, jsou **frekvence** a **akustický tlak**. Tyto veličiny jsou měřitelné pomocí elektronických přístrojů.

Ve vzduchu ale i v jiných plynech a také kapalinách se zvuk šíří **podélným vlněním**, při kterém částice pružného tělesa kmitají kolem rovnovážné polohy ve stejném směru šíření zvukové vlny. V důsledku toho dochází ke střídavému zhuštění a zředění vzduchu, které se v prostoru projevuje časovými i prostorovými změnami tlaku. Tyto změny, jejichž původcem je zdroj zvuku, mohou probíhat periodicky a také neperiodicky. Zvláštní případ periodického děje je sinusový průběh charakterizovaný určitým kmitočtem. Tlak v libovolném bodu zvukového pole je dán součtem barometrického tlaku a proměnlivého tlaku, které označujeme jako akustický tlak. Jelikož lze akustický tlak popsat pouze jeho velikostí jedná se o skalární veličinu. Akustický tlak vyvolává změny hustoty prostředí a jeho teploty. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu je přibližně 340 m/s, ve vodě 1500 m/s, ve skle až 5200 m/s.

Příčné vlnění nastává, když částice pružného tělesa kmitají kolmo na směr šíření zvukové vlny. Je charakteristické pro pružná pevná tělesa ve tvaru tyčí, vláken nebo i pro vodní hladinu. Příčné vlnění snadno vytvoříme na hadici, kterou volně položíme na podlahu a jejíž jeden konec rozkmitáme. [1]

Ohybové vlnění vzniká v předmětech, ve kterých převládá jeden nebo dva rozměry oproti ostatním, například u desek a tyčí. Jedná se o složené vlnění z vlnění podélného a příčného. [1]

Kmitočet (frekvence) zvuku je subjektivně vnímán jako výška tónu (zvuk o různých kmitočtech je vnímán lidským uchem s nestejnou citlivostí). Z fyzikálního hlediska vyjadřuje počet kmitů (periodických změn akustického tlaku) za jednu sekundu. Souvisí s vlnovou délkou a rychlostí zvuku. Veličina se označuje f , vyjadřuje se v hertzech [$\text{Hz} = 1/\text{s}$] a odvodí se ze vztahu: [1]

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{T}, [\text{Hz}] \quad (1)$$

Kde:

- c je rychlost zvuku v daném prostředí [m/s] (pro vzduch $c_0 \sim 340 \text{ m/s}$),
- λ je vlnová délka [m] – dráha, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu,
- T je perioda [s], tj. doba jednoho kmitu.

Zvukové vlnění lze rozdělit podle jeho frekvence na:

- **Infrazvuk** je postupné podélné vlnění v pružném prostředí, jehož kmitočet je pod pásmem slyšitelných kmitočtů ($f < 16 \text{ Hz}$), [1]
- **Nízkofrekvenční zvuk** je slyšitelný zvuk s tónovými složkami v pásmu kmitočtů nižších než 100 Hz , [1]
- **Vysokofrekvenční zvuk** je slyšitelný zvuk s tónovými složkami v pásmu kmitočtů vyšších než 8 kHz , [1]
- **Ultrazvuk** je postupné podélné vlnění v pružném prostředí, jehož kmitočet je nad pásmem slyšitelných kmitočtů ($f > 20 \text{ kHz}$). [1]

Hluk je jakýkoli zvuk, který přichází člověku nevhod, ruší jeho pohodu a výkonnost nebo působí nepříznivě na sluch. Hluk tedy není definován fyzikálně, ale podle svého účinku na člověka. Stejný sled zvukových podnětů (např. hlasitá hudba) může být pro jednoho člověka zdrojem příjemné stimulace a pro jiného obtížnou hlukovou zátěží. Míra rušivosti zvuku závisí také na postoji a na míře tolerance posluchače k danému zvuku a jeho zdroji. Např. uživatelé budov jsou většinou tolerantnější ke zdrojům hluku zvenčí než k hluku vznikajícímu v budově. Obvykle méně vadí hluk ze zdroje, který je považován za neutišitelný (dopravní hluk na ulici), než od jiných uživatelů budovy, ačkoli je hluboce podlimitní (např. klepot podpatků po podlaze nebo napouštění vody do vany). [1]

Podle fluktuace úrovně hluku rozeznáváme:

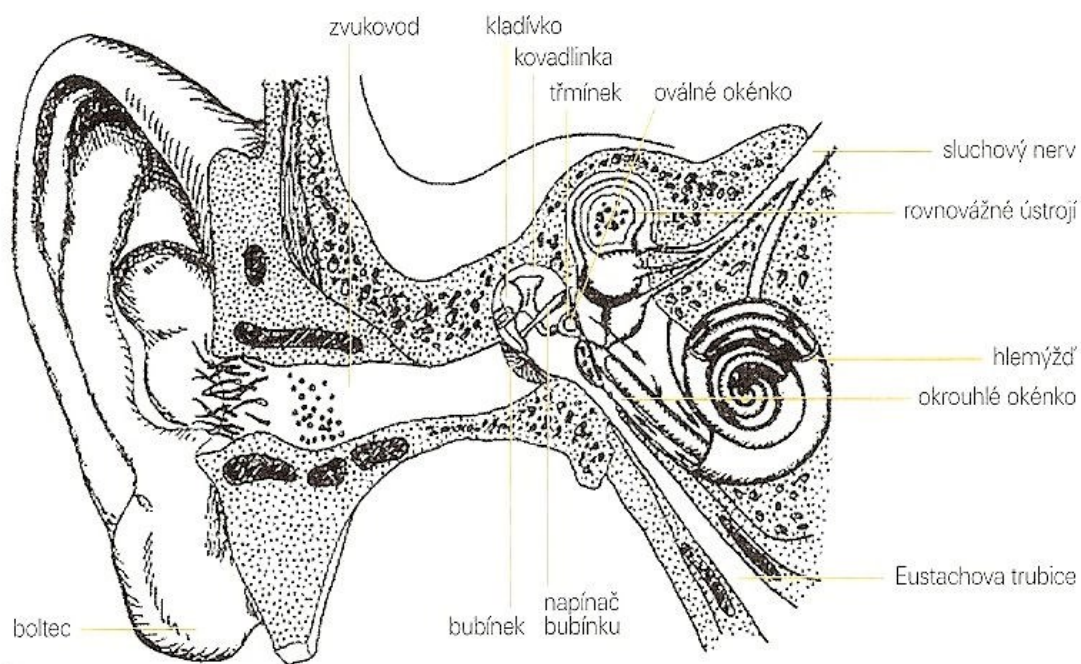
- **Ustálený hluk** je hluk, jehož hladina akustického tlaku se v daném místě nemění o více než 6dB.
- **Proměnný hluk** je hluk, jehož hladina akustického tlaku se v daném místě o více než 6 dB.
 - **Kolísavý hluk** je hluk, který se s časem plynule mění.
 - **Přerušovaný hluk** – hladina hluku se mění náhle v trvajících časových pásmech.
 - **Impulzní hluk** je hluk tvořený jedním impulzem nebo sledem impulzů, kdy doba trvání každého impulzu je kratší než 0,2 s a impulzy následují po sobě v intervalech delších než 0,01 s. Jedná se o akustický děj převyšující hluk pozadí nejméně o 10 dB.
 - **Vysoce impulzní hluk** je tvořen impulzy, jejichž zdrojem je střelba, trhací, důlní a demoliční práce s pomocí výbušnin a nárazy při posunování vagonů.
- **Vibrace** vznikají mechanickým kmitáním a chvěním pevných těles. Velikost vibrací se vyjadřuje výchylkou, rychlostí nebo zrychlením. Pro potřeby hygienického hodnocení vibrací se jako určující veličina používá hladina zrychlení vibrací L_a [dB] a efektivní hodnota zrychlení vibrací a_e [m/s²].[1]
- **Mechanické rázy a otřesy** tvoří zvláštní skupinu kmitání a jsou charakterizovány náhlou změnou síly, polohy, rychlosti nebo zrychlení.[1]

1.2 Člověk a zvuk

1.2.1 Jak a čím vnímáme zvuk

Vnímání zvuku je složitý fyziologický a psychologický proces. Sluchový orgán (obr. 1) dělíme na tři části – zevní ucho, střední ucho a vnitřní ucho. [1]

Zevní ucho tvoří boltec a zvukovod. Boltec umožňuje lokalizovat směr zvuku. Jeho schopnosti se projevují až při kmitočtu zvuku 500 Hz, optimální frekvencí je 5 kHz (nejlépe lokalizujeme směr). Výhodu oproti nám mají zvířata s velkýma ušima, kterým stačí hýbáním uší upřesnit směr, odkud přichází zvuk, člověk si musí pomáhat malými pohyby hlavy. Zvukovod je trubice o délce 25 mm a tloušťce 7-8 mm, která plní dvě hlavní funkce. Za prvé funguje jako ochrana středního ucha před poškozením. Za druhé v ní dochází k rezonanci dopadajícího zvuku (v pásmu 2 až 6 kHz), a tím k úpravě intenzity zvuku v závislosti na frekvenci. Pro frekvenci 4 kHz narůstá hladina akustického tlaku před bubínkem až o 10 dB. [1]



Obr. 1: Sluchový orgán a jeho vnitřní uspořádání[1]

Střední ucho je od zevního ucha odděleno bubínkem. Jedná se o oválnou blanku o vertikálním průměru 9 až 10 mm. Na bubínek jsou napojeny 3 malé kůstky (nejmenší v našem těle) – kladívko, kovádlínka a třmínek. Dopadající zvuk rozkmitá bubínek a přes systém tří kůstek se převádí kmity dál do vnitřního ucha. Zároveň zde dochází k ochraně ucha před nadměrným hlukem. Pokud zvuk překročí hladinu 70 dB, dochází díky třmínkovému svalu k reflexnímu stáhnutí svalů, a tím i k ochraně vnitřního ucha před nadměrným hlukem. Nevýhodou je, že k reflexní reakci dochází s určitým časovým zpožděním (latencí). Pokud je doba trvání vysoké hladiny zvuku kratší než 30 ms (doba zpoždění), ucho nestačí takový hluk včas zaregistrovat a nedojde k jeho ochraně. Proto mohou být krátké impulzní hluky mnohem nebezpečnější než ustálený hluk. Do středního ucha ústí také Eustachova trubice, která spojuje dutinu středního ucha s nosohltanem. [1]

Vnitřní ucho je umístěno v kanálcích ve skalní kosti. Nachází se zde dva smyslové orgány – rovnovážné ústrojí (pomáhá nám udržovat rovnováhu) a sluchová část vnitřního ucha. Sluchová část se nachází v tzv. hlemýždi. Hlemýžď je vyplněn tekutinou. Důležitou součástí hlemýždě je Cortiho orgán, který obsahuje přes 20 000 vláskových buněk s nervovými zakončeními a převádí mechanické kmity ze středního ucha na signály, které mohou být zpracovány nervovým systémem. Cortiho orgán je spojen sluchovým nervem s mozkovou kůrou, kde dochází ke konečné analýze zvukového podnětu. [1]

Vzhledem k velkému množství nelinearit lidského ucha jsou měřicí přístroje (zvukoměry) upraveny tak, aby se co nejvíce přizpůsobily vlastnostem lidského ucha. Jsou však vlastností lidského ucha, které nelze žádným přístrojem spolehlivě postihnout: [1]

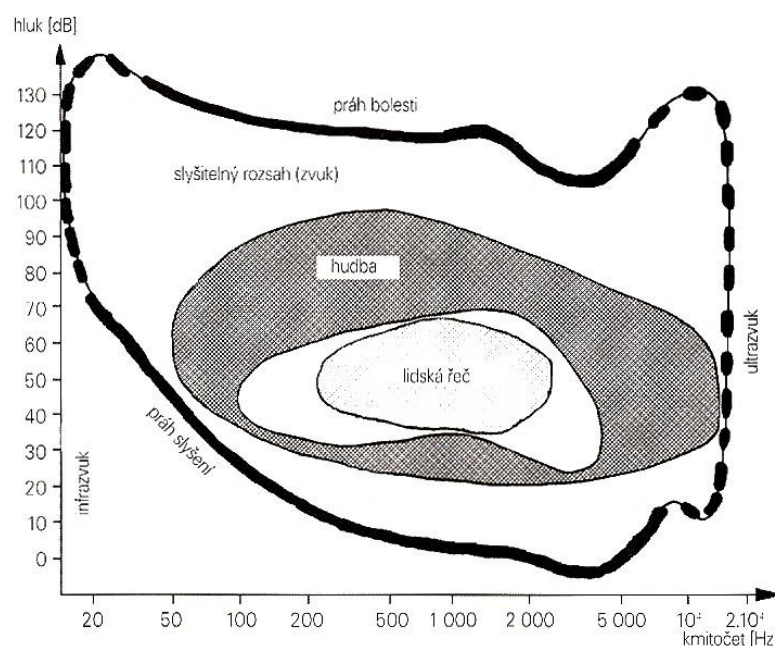
- díky tzv. maskovacímu efektu nemusí být uchem vnímány poměrně intenzivní signály, pokud je současně vnímám jiný silnější kmitočtově blízký signál,
- v systému přenosu počítka vznikají nové, zkreslující složky (s vyšším kmitočtem), neobsazené v dopadajícím signálu (většinou jsou díky maskovacímu efektu podružné, ale mění barvu tónu),
- sluch může vnímat i neexistující sluchové podněty (např. tinnitus = zvonění v uších), které nastávají v důsledku fyziologických změn (dočasných nebo trvalých) ve sluchovém orgánu nebo v jeho okolí,
- vyšší kmitočty mají pro srozumitelnost řeči větší důležitost než tón základní, a tak se při zdůraznění nižších kmitočtů (útlumem vyšších kmitočtů se vzdáleností nebo zesílením při reprodukci) srozumitelnost zhoršuje – tzv. nádražní efekt. [1]

1.2.2 Práh slyšení

Prah slyšení je závislý na kmitočtu. Pro kmitočet 1 000 Hz udává hodnoty kolem 0 dB, tj. intenzity právě zachytitelné uchem mladého zdravého člověka. Maximální prakticky se vyskytující intenzity hluku dosahují 130-140 dB. Od hodnot nad 120 dB začíná člověk vnímat hluk jako bolest. Zde se nachází prah bolesti. Mezi prahem slyšení a prahem bolesti se nachází oblast slyšitelnosti neboli sluchové pole. [1]

1.2.3 Oblast slyšení (sluchové pole)

Oblast slyšení je u člověka vymezena pásmem slyšitelných kmitočtů přibližně od 16 Hz do 20 kHz. Tento rozsah citlivosti lidského sluchu je velmi subjektivní a závisí na zdravotním stavu, věku a zatěžování sluchu posluchače. Může se stát, že šestnáctiletý pravidelný návštěvník technoparty má rozsah slyšení menší než zdravý šedesátník. Obecně ale platí, že s přibývajícím věkem se rychle zhoršuje slyšitelnost především v oblasti vysokých frekvencí. Lidé kolem 50 let často nemohou vnímat hudební tóny od 8 do 10 kHz. Ve sluchovém poli je možno najít oblast frekvencí a intenzit řeči a hudby [1]



Obr. 2: Rozsah slyšení u zdravého člověka v závislosti na hladině intenzity zvuku a kmitočtu[1]

1.3 Vliv hluku na člověka

Účinek zvuku na člověka je závislý nejen na intenzitě a frekvenci, ale i na řadě dalších faktorů, jako je čas, informační hodnota zvuku a okolnosti jeho působení, vztah osoby příjemce ke zdroji zvuku (např. hluk způsobený nám blízkou osobou jsme schopni tolerovat více než hluk způsobený sousedem). Je podmíněn též individuálními vlastnostmi; lidé se neobvykle liší reakcemi na hluk podle svých konstitučních předpokladů, zdravotního stavu, pohlaví, věku a kulturně-sociálními podmínkami. Například tatáž hudba může být pro někoho příjemná, pro jiného se stává nepříjemným hlukem. [1]

Běžný, normální, známý hluk je nazýván habituální a je přijímaný bez větší psychické a zdravotní újmy. Jde o hluk na pracovišti, v domácnosti, v dopravním prostředku, pouliční ruch (hluková kulisa). Emoční hluk je náhlý a neobvyklý, který signalizuje nebezpečí nebo vyvolává minulé nepříjemné zážitky (houkačka sanitky). V případě, že tento hluk nenesou významnou informaci, rychle se habituuje (zařadí mezi běžné zvuky). [1]

Habituální i emoční hluk mají vliv na vzestup krevního tlaku, ale cesta působení a mechanismus jsou rozdílné. Habituální hluk působí zvednutí krevního tlaku až od hladiny akustického tlaku $L_A - 65$ dB (má práh účinku). Emoční hluk může působit, i když je jeho hladina hlasitosti na hranici prahu slyšitelnosti (např. zvuk komára v noci). Neřídí se žádnými vztahy mezi dávkou a účinkem. [1]

Účinky hluku na člověka je možné rozdělit na specifické, zprostředkované přímo sluchovým orgánem, a systémové, zprostředkované speciálními strukturami nervového systému. Specifické účinky hluku na člověka se mohou projevit sluchovou únavou, sluchovou ztrátou a akustickým traumatem. Systémové účinky se mohou projevit poruchami metabolismu, spánku, srdečně-cévního systému, snížením psychické výkonnosti i narušením duševní pohody. [1]

Hluk může přispívat ke vzniku pracovních nehod a úrazů (na hlučných pracovištích vzniká více pracovních úrazů). Může také vést ve zvýšené míře k alkoholismu a přispívá ke zvýšení počtu chyb ve výrobním procesu, protože má záporný vliv na soustředění pracovníků. Dlouhodobá zátěž hlukem o hladinách vyšších než 85 dB (obvykle u pracujících v hlučných provozech) vyvolává sluchovou ztrátu. Při působení silného zvuku dochází ke změnám na smyslových a nervových buňkách Cortiho orgánu ve vnitřním uchu, které jsou nejdříve vratné. Takové změny označujeme za sluchovou únavu a projevují se dočasným zvýšením prahu slyšitelnosti. Zotavení může trvat od několika minut do několika dní. Při dlouhodobém nebo opakovaném působení se změny stávají nevratnými a dochází k trvalému posunutí sluchového prahu. Je zde však třeba podotknout, že zhoršování sluchu nastupuje v dospělosti i fyziologickým stárnutím, ať již po 30. Roce a zřetelněji pak od páté dekády (stařecká nedoslýchavost). Impulzní hluk a exploze s hladinami nad 130 dB mohou vyvolat přímé poranění sluchového orgánu (bubínku, kůstek středního ucha i části vnitřního ucha). Protržení bubínku a jiné vážné poškození sluchu spolehlivě způsobí hodnota hladiny akustického tlaku cca 160 dB. Akutní poškození sluchu hlukem označujeme jako akustické trauma[1]

Nebezpečným druhem hluku jsou vibrace a otřesy. Jedná se o mechanické kmity, které jsou organismem vnímány prostřednictvím povrchových a hlubokých kožních smyslových buněk, pokud překročí určité prahové hodnoty. Vibrace působí kmitání vysokou frekvencí, otřesy působí kmitání nízkou frekvencí. [1]

Podle způsobu přenosu se vibrace dělí na:

- celkové vibrace (přenášejí se na sedící nebo stojící osobu z vibrujícího sedadla nebo plošiny tak, že způsobují intenzivní vibrace celého organismu; vibrace se hodnotí v pásmu 0,5-80 Hz),
- celkové vibrace v budovách o frekvencích 1-80 Hz,
- celkové vertikální vibrace o frekvenci nižší než 0,5 Hz (vyvolávají tzv. nemoci z pohybu neboli kinetózy),
- místní vibrace přenášené na ruce (při práci s vibrujícími nástroji o frekvencích 8-1 000 Hz),
- místní vibrace přenášené zvláštním způsobem (z křovinořezů či postřikovačů na hlavu, páteř, ramena aj. o frekvencích 1-1000 Hz).

Otřesům a vibracím přenášeným na celé tělo jsou lidé vystaveni v dopravních prostředcích nebo v budovách, ve kterých jsou umístěny nedokonale odizolované zdroje kmitání a chvění. [1]

Otřesy, které se přenášejí na celý organismus, nepůsobí žádné specifické onemocnění, ale mohou přispívat ke vzniku některých chorob (např. onemocnění zažívacího ústrojí, svalového a kostního systému i častější onemocnění oběhového systému). Přenos vibrací na ruce se uplatňuje při držení vibrujícího nástroje, jak je tomu při práci s pneumatickými vrtačkami, sbíječkami, motorovými pilami apod. Nejčastějším klinickým projevem škodlivého působení vibrací je postižení nervové regulace průsvitu cév okrajových částí rukou, tzv. traumatická vazoneuróza. [1]

1.3.1 Příklady hlukových hladin vyskytující se v běžném životě

V následující tabulce je pro představu porovnání různých prostředí z hlediska intenzity akustického tlaku

Tab. I: příklady hlukových hladin v závislosti na prostředí

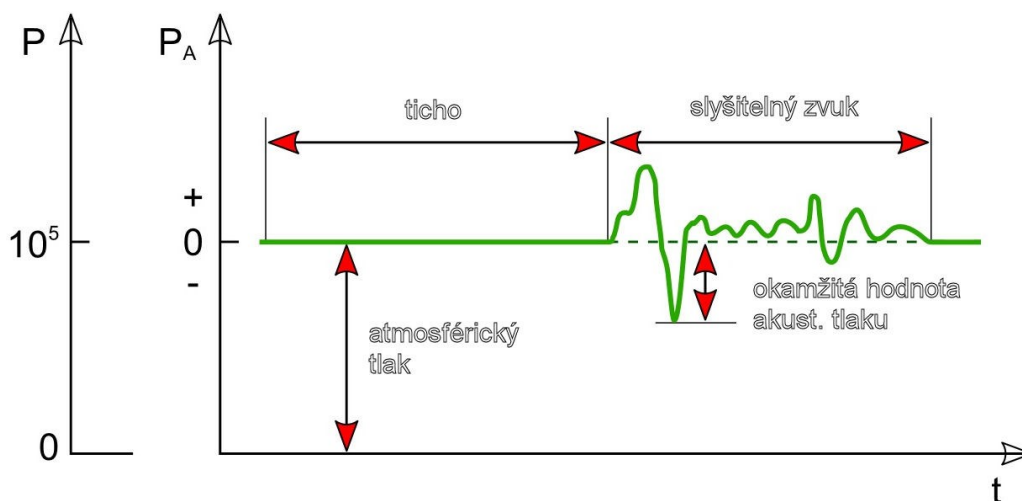
Charakteristika hluku	Akustický tlak p (Pa)	Hladina akust. Tlaku L_p (dB)
Práh slyšení	0,00002	0
Tichý les	0,0001	15
Obývací pokoj	0,002	40
Psaní na stroji, hlasitý rozhovor, pouliční hluk	0,02	60
Domácí spotřebiče- vysavač	0,06	70
Automobil	0,2	80
Jedoucí vlak, ventilátor	0,6	90
Pneumatická vrtačka, rockový koncert	2	100
Tryskové letadlo	20	120
Práh bolesti	60	130

1.4 Pojmy a veličiny v akustice

1.4.1 Akustický tlak; p [Pa]

Akustický tlak p je střídavá složka tlaku vlnícího se prostředí. Vyjadřuje odchylku od klidové hodnoty barometrického tlaku a jeho hodnota je v porovnání s barometrickým tlakem nepatrná (asi milióntina). Lidské ucho vnímá akustický tlak jen v určitém rozsahu, který je závislý na zvukové frekvenci, a jeho dolní hranici nazýváme práh slyšení. Jeho hodnota pro $f = 1000$ Hz

činí $p_o = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Akustický tlak je střídavý (zhušťování a zředování kmitajících částic), a proto se v praxi využívá k jeho vyjádření efektivní hodnoty akustického tlaku [Pa].



Obr. 3: kolísání akustického tlaku okolo barometrického

Vzájemný vztah mezi intenzitou zvuku a akustickým tlakem je možné vyjádřit následovně:

$$I = \frac{p^2}{Z} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2)$$

Kde: p - efektivní hodnota akustického tlaku zvuku [Pa],

Z - vlnový odpor prostředí (pro vzduch je $Z_0 = 401,2 \text{ N.s.m}^{-3}$).

1.4.2 Rychlost šíření zvukového vlnění; $c \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$

Vlnění se šíří rychlostí závislou na fyzikálních parametrech prostředí. Pro rychlost příčných vln v pevném prostředí platí: [4]

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

Kde: G – modul pružnosti ve smyku

ρ – hustota prostředí

pro rychlost podélných vln v pevných látkách tvaru tenké tyče, kde dochází k namáhání v tahu lze psát: [4]

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (4)$$

Kde: E – modul pružnosti v tahu.

V kapalinách a plynech není možno vytvořit smyková napětí, proto v nich nemůže vzniknout příčné vlnění, ale pouze podélné. Tato prostředí vykazují při stlačování jen objemovou pružnost, nikoliv pružnost ve smyku nebo tahu jako u pevných látek. Rychlost podélných vln je u nich dána vztahem: [4]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} [\text{m.s}^{-1}] \quad (5)$$

Kde: K – modul objemové pružnosti. Pokud neuvažujeme přenos tepla (tj. při adiabatických změnách plynu), je možno modul objemové pružnosti vyjádřit jako součin Poissonovy konstanty κ a tlaku p [4]

Po úpravách a dosazení známých hodnot dostáváme pro rychlost šíření zvuku ve vzduchu rovnici:

$$c = c_0 + 0,6 \cdot \vartheta [\text{m.s}^{-1}] \quad (6)$$

Kde: c_0 – rychlost zvuku při teplotě 0°C ; $331,8 [\text{m.s}^{-1}]$
 ϑ – teplota $[^\circ\text{C}]$

1.4.3 Vlnová délka; λ [m]

Zvukové vlnění má všechny vlastnosti vlnění v prostoru. Vlnová délka je vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body, které mají stejnou velikost, nebo je to vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna po dobu jedné periody T . Vlnovou délku můžeme vyjádřit rovnicí:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} [\text{m}] \quad (7)$$

kde: T - je perioda [s],
 f - je frekvence vlnění [Hz],
 v – je rychlost zvuku pro dané prostředí $[\text{m.s}^{-1}]$.

Vlnové délky zvuku ve vzduchu jsou v rozmezí od 21 m pro frekvenci 16 Hz do 17 mm pro frekvenci 20 kHz.

1.4.4 Akustická rychlost; v $[\text{m.s}^{-1}]$

Akustická rychlost charakterizuje okamžitou rychlost bodu při určité výchylce. Získáme ho parciální derivací akustické výchylky podle času:

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \omega A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) [\text{m.s}^{-1}] \quad (8)$$

Kde: ω - kruhová frekvence $[\text{rad.s}^{-1}]$
 A - amplituda výchylky

ωA - představuje amplitudu akustické rychlosti v_0

x - okamžitá výchylka [m]

c - rychlost šíření vlnění [m.s⁻¹]

1.4.5 Akustický výkon zdroje zvuku; P [W]

Akustický výkon zdroje zvuku P ve wattech je hlavní charakteristická vlastnost zdroje zvuku. Zdroj zvuku vyzařuje energii ve formě akustických vln. Ve volném prostoru pak všechny vyzařené akustický výkon přechází jistou uzavřenou plochou S , která plně obklopuje akustický zdroj. [1] Jedná se tedy o výkon přenášený akustickým vlněním. Jeho okamžitá hodnota je definována vztahem:

$$P(t) = \frac{dW}{dt} \text{ [W]} \quad (9)$$

Kde: dW - energie zvukových vln prošlá nebo dopadající na uvažovanou plochou za čas dt .

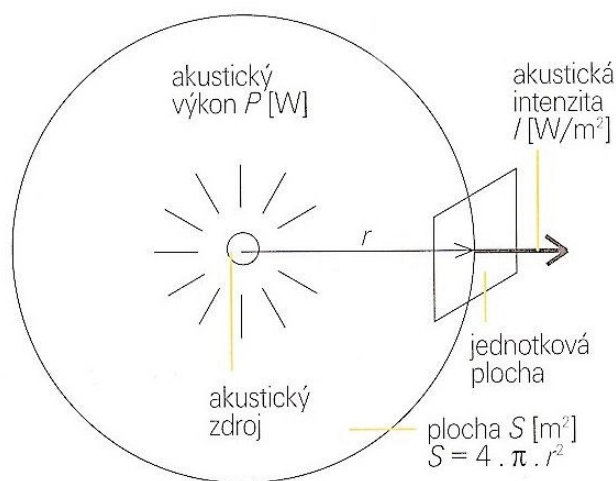
Akustický výkon lze vyjádřit i vztahem:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v = p \cdot v \cdot S \quad (10)$$

Kde: v - akustická rychlost [m.s⁻¹],

p - akustický tlak [Pa],

S – uvažovaná plocha [m²].



Obr. 4: akustický výkon zdroje zvuku[1]

1.4.6 Intenzita zvuku; I [W/m²]

Intenzita zvuku I je akustický výkon procházející jednotkovou plochou. Její veličinou je W/m² a lze ji stanovit ze vztahu:

$$I = \frac{P}{S} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (11)$$

Kde P - akustický výkon zdroje [W];

S - celková uzavřená plocha [m²], v případě bodového zdroje $S = 4\pi r^2$.

Akustická intenzita zvuku ve volném prostoru od bodového zdroje ubývá se čtvercem vzdálenosti (úměrně se zvětšováním plochy povrchu koule o poloměru r). [1]

Citlivost lidského ucha pro vnímání akustické intenzity není vždy stejná, ale s rostoucí intenzitou se snižuje. Tato vlastnost sluchu nám umožňuje vnímat i velmi slabé zvukové signály s vysokou citlivostí, ale zároveň nás chrání před zvukem vysoké intenzity. Například: když máme třígramové závaží a přidáme jeden gram tak tuto změnu subjektivně dobře poznáme, ale pokud budeme mít 3kg závaží a přidáme opět jeden gram, bude změna hmotnosti vnímána jako nepatrná. Při zkoumání této závislosti bylo zjištěno, že existuje logaritmická závislost mezi velikostí zvukového podnětu a velikostí sluchového vjemu (Fechner-Weberův zákon). Tato vlastnost sluchu byla důvodem k zavedení logaritmické míry (decibelové stupnice) při kvantifikaci akustických veličin. [1]

1.4.7 Hladina intenzity; L_I [dB] a hladina akustického tlaku; L_p [dB]

Hladina intenzity zvuku L_I je logaritmické vyjádření poměru mezi skutečnou intenzitou zvuku I a smluvenou hranicí intenzity zvuku $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ (referenční hodnota intenzity zvuku na prahu slyšení). Jednotkou je jeden decibel [dB], protože rozdíl 1 dB je přibližně stupněm právě uchem rozlišitelným. Hladina intenzity zvuku se stanoví ze vztahu:

$$L_I = 10 \cdot \log(I/I_0). \text{ [dB; W/m}^2\text{]} \quad (12)$$

Hladina akustického tlaku L_p popisuje, jak silně na nás zvuk působí. Je vyjádřením míry akustické intenzity a odvozuje se pomocí logaritmického vyjádření poměru mezi skutečnou hodnotou akustického tlaku p a smluvenou hranicí akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (hodnota akustického tlaku zvuku na prahu slyšení). Jednotkou je decibel [dB]. Hladina akustického tlaku zvuku se stanoví ze vztahu:

$$L_p = 10 \cdot \log(p/p_0)^2 = 20 \cdot \log(p/p_0). \text{ [dB]} \quad (13)$$

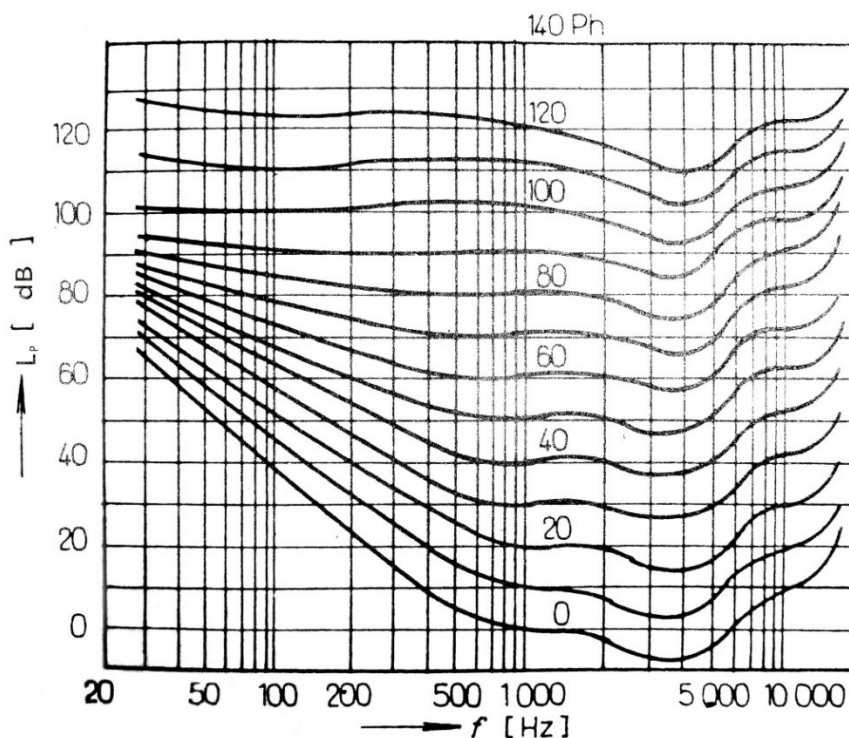
Hladina akustického tlaku a hladina intenzity zvuku, sledovaná ve směru šíření zvuku, mají přibližně stejnou hodnotu: $L_I = L_p$.

- **Sčítání hladin akustického tlaku** - hladiny se nedají sčítat přímo, ale pomocí energetického součtu. Při počítání s hladinami se projeví zvýšení sledované veličiny určitým násobkem jako aditivní přírůstek, nezávislý na výchozí hodnotě. [1] Například máme-li dva zdroje hluku o hladinách $L_{P1}=64\text{db}$ a $L_{P2}=70\text{db}$ výsledná hladina bude rovna:

$$L_P = 10 \cdot \log \left(10^{L_{P1}/10} + 10^{L_{P2}/10} \right) = 10 \cdot \log \left(10^{64/10} + 10^{70/10} \right) = 71\text{db}$$

1.4.8 Hladina hlasitosti; $\Lambda[\text{Ph}]$ a křivky stejné hlasitosti

Protože závislost hlasitosti na intenzitě se se zřetelem ke kmitočtové závislosti citlivosti sluchu se pro různé frekvence liší, předpokládá se platnost vztahu (11.2) pouze pro referenční frekvenci 1kHz. Pro jiné frekvence je zapotřebí hladinu hlasitosti stanovit subjektivním srovnáním – viz obr. 5. Jednotkou hladiny hlasitosti je fón (Ph). 1Ph odpovídá při 1kHz 1dB.



Obr. 5: Kingsburyho křivky stejné hlasitosti[9]

1.4.9 Hladina akustického tlaku; $A L_A [\text{dB}]$

Hladina akustického tlaku $A L_A [\text{dB}]$ je hladina akustického tlaku získaná měřením pomocí měřicího přístroje (zvukoměru). Jak již bylo řečeno, lidský sluch vnímá zvuk o různém kmitočtu s nestejnou citlivostí. (Viz obr. 5). Při poslechu tak dochází ke zkreslování zvuku v závislosti na velikosti akustického tlaku. Proto byly zavedeny do měřicích přístrojů tzv. váhové filtry, které

upravují citlivost zvukoměru v souladu s citlivostí lidského ucha. Nejpoužívanějším typem váhového filtru je váhový filtr typu A, který ke každé změřené hodnotě hladiny akustického tlaku přiřítá jinou korekci C (korekce jsou předepsány normou). Ve výsledném energetickém součtu hladin je pak vliv některých kmitočtů posílen a jiných potlačen. Každé pásmo má pak jinou váhu podle přidělených korekcí. [1]

1.4.10 Akustická impedance; Z_a [N.s.m⁻³]

Akustická impedance Z_a – je poměr akustického tlaku a objemové rychlosti. Při harmonickém kmitání může být mezi akustickým tlakem a objemovou rychlostí fázový posun, proto je akustická impedance v symbolickém vyjádření obecně komplexního charakteru: [7]

$$Z_a = \frac{p}{w} = \frac{p}{vS} \quad [\text{N.s.m}^{-3}] \quad (14)$$

Kde:

w - objemová rychlost

S - plocha

v - rychlost kmitání hmotných částic

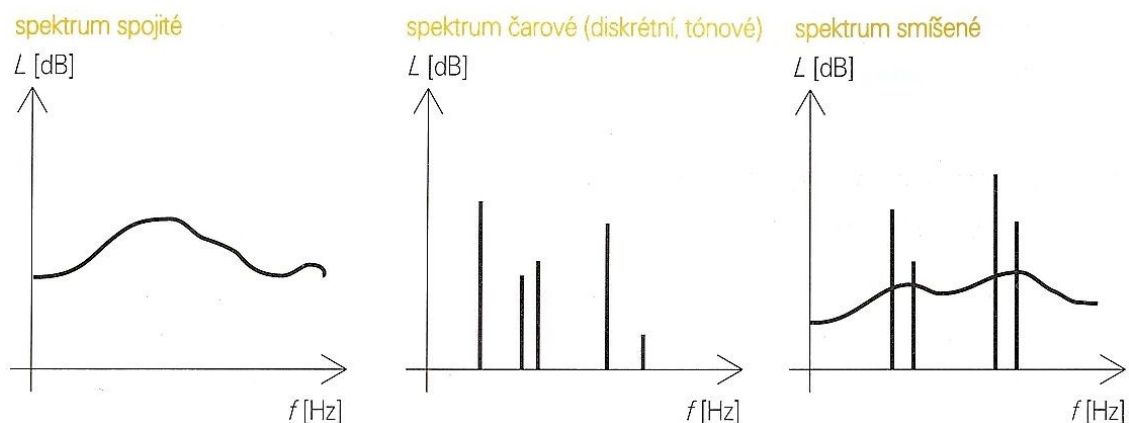
1.4.11 Měrná akustická impedance prostředí; Z [N.s.m⁻³]

Měrná akustická impedance prostředí Z je vztažena k jednotkové ploše. Tato veličina je dána vlastnostmi prostředí a nezávisí na rozměrech a tvaru akustické soustavy: [7]

$$z_a = \frac{p}{v} \quad [\text{N.s.m}^{-3}] \quad (15)$$

1.4.12 Akustické spektrum

Akustické spektrum poskytuje představu o charakteru zvuku z hlediska zastoupení různých kmitočtů. Jedná se o soustavu hodnot akustické veličiny (např. hladiny akustického tlaku) uváděné v závislosti na kmitočtu. Většina zvuků, které známe, mají spojitě spektrum, diskrétní (*tónové*) spektrum mají hudební nástroje a smíšené spektrum, tj. spojitě s výraznými tónovými složkami, mají některá strojní a technická zařízení. [1]



Obr. 6: Akustická spektra zvuku[1]

1.4.13 Oktávová a třetin-oktávová pásma

Oktávová a třetin-oktávová pásma se zavedla pro zjednodušení práce s akustickými veličinami při sledování kmitočtového složení zvuku. Oblast slyšitelných kmitočtů se rozděluje na 11 oktávových pásem, z nichž každé je charakterizováno svým středním kmitočtem. Oktáva je interval mezi dvěma kmitočty f_1 a f_2 , kde $f_2 = 2f_1$. Pro přesnější výpočty se používá podrobnější rozdělení na 33 třetin-oktávových pásem. Třetin-oktáva je interval mezi dvěma kmitočty f_1 a f_2 , kde $f_2 = 2^{1/3}f_1$. V oblastech stavební akustiky se využívají pro výpočty a měření většinou spektra od 100 do 4 000 Hz. Je to proto, že z hlediska nepříznivých účinků běžných zdrojů zvuku mají ostatní pásma zpravidla menší důležitost. V urbanistické akustice se většinou pracuje jen s 6 oktávovými pásmy v rozsahu od 125 do 4 000 Hz, v akustice stavebních konstrukcí s 16 třetin-oktávovými pásmy od 100 do 3150 Hz a v prostorové akustice s 22 třetin-oktávovými pásmy od 63 do 8 000 Hz. [1]

1.5 Pohlcování zvuku

Dobré akustické podmínky uzavřených prostorů vyžadují mj. takovou úpravu, aby doba dozvuku byla optimální. Aby se toho dosáhlo, provádějí se úpravy pohltivosti stěn tak, že se maximálně využívá pohltivých vlastností některých látek a konstrukcí. Při vytváření akustického návrhu musíme znát míru jejich schopnosti pohlcovat zvuk.

Akustické obklady pro pohlcování zvuku nelze zaměňovat s materiály pro zlepšení zvukové izolace stavebních a jiných konstrukcí, neboť pohltivé akustické obklady mají velmi nízký stupeň vzduchové neprůzvučnosti. [9]

1.5.1 Způsoby redukce hluku:[5]

1. metoda - redukce hluku vycházejícího přímo ze zdroje pomocí vhodných technologických řešení. Tato metoda je nejúčinnější, ale nelze samozřejmě využít vždy a všude,
2. metoda - metoda dispozice je založena na vhodném umístění zdrojů hluku od oblastí chráněných a méně hlučných,
3. metoda - spočívá ve zvukovém odizolování zdroje hluku nebo i celého prostoru od prostorů, které chceme před hlukem chránit,
4. metoda - využívá zvukové pohltivosti, jako vlastnosti některých materiálů přeměňovat zvukovou energii v energii jinou,
5. metoda - spočívá v používání osobních ochranných pomůcek.

V mé práci se chci věnovat hlavně 4. metodě, a tedy využívání materiálů, které přeměňují zvukovou energii při šíření v pevných látkách na jinou energii, zejména v teplo vlivem tření. Tyto materiály jsou nejvíce ve formě akustických obkladů. Dalšími možnostmi jsou přeměny vznikající poklesem akustického tlaku, anebo nepružnou deformací těles. Z hlediska pohlcování zvuku můžeme obklady rozdělit do tří skupin:

- obklady tvořené porézními materiály,
- obklady založené na principu rezonance,
- složené pohltivé konstrukce.

Kromě uvedených druhů obkladů pohlcují zvuk i různé užitkové a okrasné předměty, u nichž není pohltivost primární vlastností, avšak pro návrh prostoru je zapotřebí znát jejich pohltivost.

1.5.2 Mechanika pohlcování

Pod pojmem pohlcování zvuku rozumíme nevratnou přeměnu zvukové energie v energii jinou. Z tohoto hlediska můžeme způsob přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách rozdělit na tři druhy: [9]

- přeměny vznikající třením,
- přeměny vznikající poklesem akustického tlaku, tj. změnami relaxačními,
- přeměny vznikající nepružnou deformací těles.

K tření dochází, pohybují-li se vzduchové částice podél určité plochy. Aby se takto přeměnilo velké množství zvukové energie, musí plocha, na které dochází ke tření, být dostatečně velká. A toho dosáhneme porézními látkami, v nichž se zvuk šíří jemnými póry, jejichž plocha je značně velká. K těmto ztrátám zvukové energie dochází především na stěnách otvorů, pórů,

kanálků, či jednotlivých vlákních. Jedny z takových porézních látek jsou právě polyuretanové pěny s otevřenou strukturou, kde je aktivní plocha na jednotku objemu velmi vysoká.

Tvoří-li akustický obklad deska nebo stěna, která je schopna mechanických kmitů v oblasti zvukového spektra, rozkmitá se vlivem dopadajících zvukových vln. Část mechanické energie kmitající desky nebo stěny se opět mění v energii akustickou, která vyzařuje do prostoru za touto překážkou. Zbytek mechanické energie se mění v energii tepelnou vlivem vnitřního tření v kmitající překážce.[9]

U některých konstrukcí pro pohlcování zvuku se uplatňují oba způsoby přeměny akustické energie v energii tepelnou. Část zvukové energie se mění v energii tepelnou vlivem vnitřního tření v rozkmitané desce nebo stěně a zbytek energie vyzařené do prostoru za deskou nebo stěnou se více či méně změní v energii tepelnou v pórech vláknitého nebo kanálkovitého akustického materiálů, který je umístěn v prostoru za deskou. [9]

Přeměna zvukové energie, kterou jsme označili jako relaxační, vzniká následkem zmenšení akustického tlaku. Představme si, že se látkou šíří zvukové vlnění. V místech, ve kterých nastává zhuštění částic, stoupá zároveň celkový tlak, tj. akustický tlak nabývá kladných hodnot. Jestliže dojde ke zmenšení neboli relaxaci akustického tlaku, zmenší se nashromážděná potenciální energie a tím se zmenší i energie zvukové vlny. [9]

Příčin relaxace tlaku může být několik. Při stlačení vzduchu nastává zvýšení jeho teploty a (jelikož soustava pórů není od kostry tepelně izolována) dojde k přestupu tepla ze vzduchu do kostry. Přestup tepla má za následek snížení teploty, a tím i zmenšení tlaku. [9]

Jiný způsob relaxace tlaku nastává při šíření zvuku pevnými látkami nebo pevnou koustou porézní látky. Mění-li se např. u vláknité látky průřez kostry, dochází v místech malého průřezu ke značnějšímu stoupnutí teploty, a jestliže je látka dobrým vodičem tepla, dojde k vyrovnání teplot s okolím a tím k relaxaci tlaku. Relaxace tlaku nastává obzvláště při šíření příčného vlnění kovovými deskami, které jsou dobrými tepelnými vodiči. Při ohybu dochází totiž k částečnému vyrovnání teplot mezi stlačenou a zahřátou stranou a stranou roztaženou a ochlazenou. [9]

K přeměně zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu, ani když síla přestane působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do původního tvaru a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti. [9]

1.5.3 Činitel akustické pohltivosti; α [-]

Schopnost látky pohlcovat zvuk je charakterizován hodnotou činitele akustické pohltivosti α , ten je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{W_P}{W_D} [-] \quad (16)$$

Kde: W_P je pohlcovaná zvuková energie

W_D je celková dopadající zvuková energie

Činitel akustické pohltivosti je bezrozměrné číslo, nabývající hodnot 0 až 1. U stěny, která pohlcuje zvuk úplně, je činitel roven 1, stěna která zvuk dokonale odráží je tento činitel roven 0.

Pohlcená energie

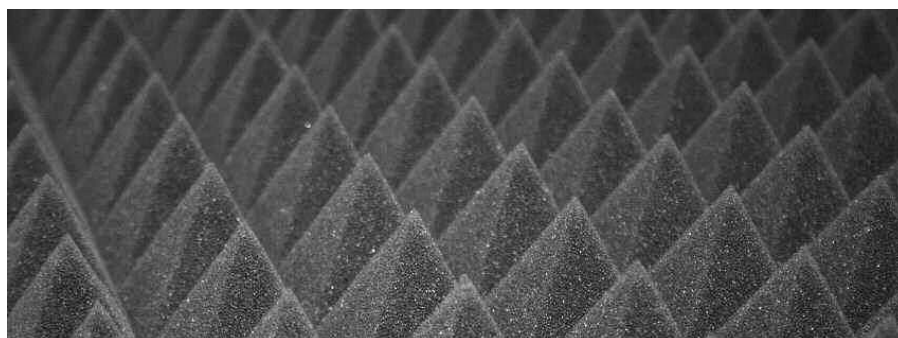
$$W_P = W_D - W_O \quad (17)$$

Kde: W_O - je odražená zvuková energie

Činitel akustické pohltivosti pro všesměrový dopad zvukových vln je větší než pro kolmý dopad zvukových vln, protože při stejné hustotě zvukové energie dopadá při všesměrovém dopadu na tutéž plochu mnohem více zvukové energie než při kolmém dopadu a tedy velikost pohlcené energie bude větší. Při měření činitele α pomocí interferenční trubice se měří tento činitel pouze pro kolmý dopad. Všesměrový dopad lze přepočítat pomocí určitých vzorců. Jednodušší je ale provést měření přímo při všesměrovém dopadu v dozvukové místnosti.

1.6 Porézní materiály

Pod pojmem porézní materiál máme v akustice obvykle na mysli pevnou látku, v jejímž objemu jsou malé dutinky vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky bývá dosti značný a činí asi 80 až 99 % celkového objemu. Kostra porézního materiálu má buď vláknitou strukturu, nebo strukturu ztuhlé pěny. Má-li materiál dobře pohlcovat zvuk, musí být její póry navzájem propojeny, aby se zvuk mohl materiálem šířit dále. Póry nemusí být propojeny u materiálů, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická, takže zvuk do ní z pórů snadno přechází. Příkladem takových materiálů jsou zpeněné měkké plastické hmoty.[9]



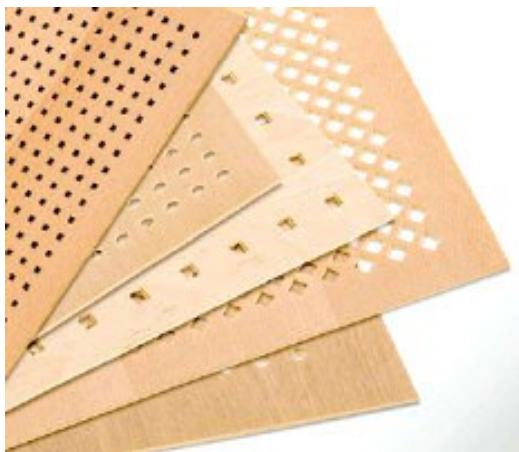
Obr. 7: Pohltivá, porézní akustická pěna

Vlastní pohlcování zvuku, tedy přeměna akustické energie v energii tepelnou, se děje v mezní vzduchové vrstvě u povrchu vláken nebo kostry vlivem viskózních sil. V mezní vrstvě dochází ke vzájemnému tření vrstev vzduchu mezi sebou, přičemž vrstva vzduchových částic na povrchu vláken nebo kostry je v klidu a vrstva vzduchových částic na druhém kraji mezní vrstvy koná pohyb odpovídající akustické rychlosti ve středu sledovaného průřezu. [9]

Porézní materiály dělíme na porézní materiály vláknité, kanálkovité a pěněné. Jiné dělení se týká vlastností materiálu, ze kterého je skelet porézního materiálu zhotoven. Zásadně rozlišujeme materiály z organických, minerálních, skleněných a syntetických hmot. [9]

Charakteristickou vlastností porézního materiálu je jeho měrná akustická impedance Z , kterou potřebujeme znát k určení α_0 . Měrná akustická impedance Z je určena třemi kmitočtově nezávislými veličinami: měrným stejnosměrným odporem r_s , činitelem struktury χ a porézností σ . [9]

Porézní materiály pro pohlcování zvuku jsou nejvíce účinné, pokud je pórovitý materiál umístěn ve vzdálenosti alespoň $\frac{1}{4}$ vlnové délky zvuku od tvrdého povrchu stropu nebo stěny. Tyto materiály tedy pohlcují převážně v pásmu vysokých frekvencí, kde vlnová délka je malá. Akustické vlastnosti těchto obkladů je možno měnit a přizpůsobovat jeho tloušťkou a případně odsazením desky pórovitého materiálu od obkládaného povrchu stropu nebo stěny. Z hygienických a estetických důvodů, ale také pro ochranu proti poškození můžeme pohlcovače chránit zatavením do velmi tenké polyetylénové fólie, zakrytím řídkou tkaninou, na které může být okrasná textura, pletivem, mřížovinou nebo děrovaným plechem. Při použití krytí z děrovaného plechu, musí být plocha děr alespoň 25-35%, jinak bude činitel pohltivosti α značně ovlivněn velkou plochou tohoto dobře odrazivého plechu.



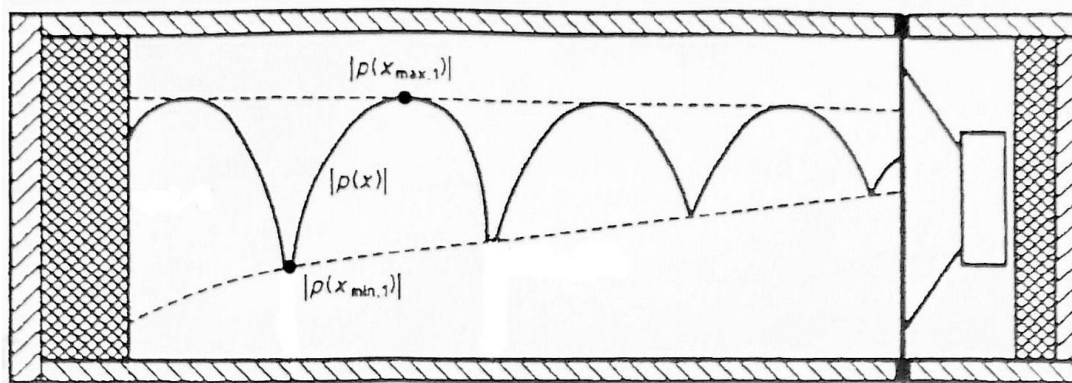
Obr. 8: Dekorativní děrované HDF desky[10]

Praktická část

2 Měření zvukové neprůzvučnosti dle normy ČSN ISO 10534-1 – určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny

2.1 Princip měření

Zkušební vzorek se upevňuje do jednoho, těsně uzavíratelného konce rovné, tuhé a hladké impedanční trubice (viz obr. 11). Dopadající rovinná sinusová zvuková vlna p_i je buzena reproduktorem v opačném konci trubice. Superpozicí $p = p_i + p_r$ dopadající vlny p_i a odražené vlny p_r od zkušební vzorku vzniká v trubici stojatá vlna. Vyhodnocení vychází ze změřených hodnot amplitudy $|p(x_{min})|$ akustického tlaku v tlakových minimech a amplitudy $|p(x_{max})|$ v tlakových maximech. Tyto údaje postačují k určení činitele zvukové pohltivosti.[8]



Obr. 9: Obrazec stojaté vlny ve zkušební trubici.[8]

Podmínky pro měření: tato metoda se opírá o skutečnost, že ve zkušebním úseku trubice (tam, kde se vyšetřuje obrazec stojaté vlny) existuje pouze vlna dopadající a odražená, šířící se rovnoběžně s osou trubice. Vznik jiných tvarů vlny je třeba zamezit. Dále se předpokládá, že se zvuková vlna v trubici šíří bez útlumu. Toto bylo možno s minimální odchylkou splnit. [8]

Vzorec pro výpočet činitele zvukové pohltivosti:

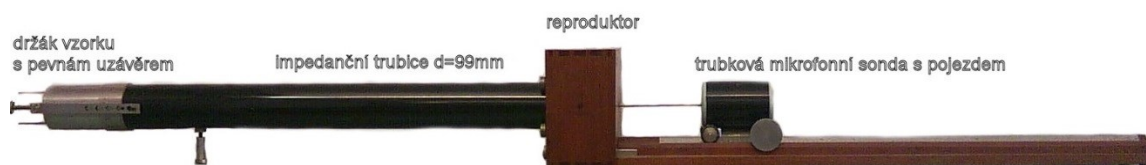
$$\alpha = \frac{4 \times 10^{\Delta L/20}}{(10^{\Delta L/20} + 1)^2} \quad (18)$$

Kde ΔL je rozdíl hladin akustického tlaku mezi tlakovým maximem a tlakovým minimem (v decibelech).

2.2 Měřicí zařízení:

Skládá se z impedanční trubice, držáku zkoušeného vzorku s uzávěrem, pohyblivé mikrofonní sondy, zařízení pro zpracování mikrofonního signálu (zvukoměr), reproduktoru, generátoru sinusového signálu s výkonovým zesilovačem.

2.3 Impedanční trubice:



Obr. 10: Impedanční trubice Brüel & Kjaer type 4002

Konstrukce musí být rovná, o konstantním průřezu (s odchylkou do 0,2%), s tuhými hladkými neporézními stěnami bez děr nebo štěrbin ve zkušebním úseku. Stěny musí být těžké a dostatečně silné (nejlépe zhotoveny z kovu, nebo v případě velkých průměrů trubice z neporézního hlazeného betonu), aby nebyly rozkmitávány zvukovým signálem a nevykazovaly rezonance v pracovním kmitočtovém rozsahu trubice. Pro kovové stěny se u trubice kruhového průřezu doporučuje tloušťka kolem 5% příčného rozměru.[8]

V našem případě to bylo bez problému splněno, při tloušťce stěn 5mm u trubice s průměrem 99mm resp. 2mm u trubice o průměru 29mm.

Pracovní kmitočtový rozsah ($f_d < f < f_h$) impedanční trubice je určen její délkou a příčným rozměrem. Aby bylo možné se zabývat dvěma tlakovými minimy i při nepříznivých fázích odrazu, musí být délka zkušebního úseku trubice $l \geq 3\lambda_0/4$ na dolním mezním kmitočtu

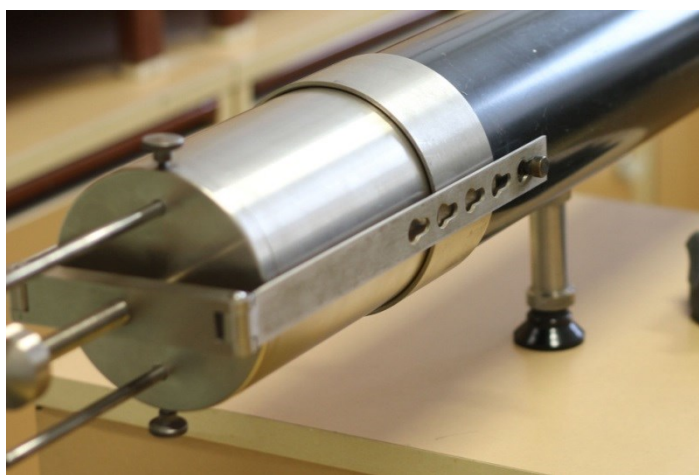
Reproduktor budí kromě rovinné vlny obvykle i vlny vyšších módů. Vlny pod nižším mezním kmitočtem prvního vyššího módu vymizí do vzdálenosti asi tří průměrů kruhové trubice. [8]

Pro měření v pásmu 100-1250Hz byla využívána trubice o průměru 99mm a délce 1m, v pásmu 1000-6300Hz byla použita trubice o průměru 29mm a délce 28cm.

Držák vzorku je buď zabudován do impedanční trubice, nebo tvoří oddělenou součást, která je během měření pevně spojena s jedním koncem trubice. V našem případě je držák vzorku oddělitelnou částí, do které lze vložit vzorek o tloušťce až 120mm pro trubici o průměru 99mm.

Popřípadě vložit vzorek menší tloušťky a nechat za vzorkem vzduchový polštář požadované hloubky. U impedanční trubice o průměru 29mm bylo možné do držáku vzorku uchytit vzorky do cca 80mm tloušťky.

Je-li držák vzorku oddělenou součástí, musí jeho vnitřní tvar a rozměry souhlasit s impedanční trubicí s odchylkou do 0,2 %. Připevnění k trubici musí být pevné. Doporučuje se začlenit držák vzorku do impedanční trubice a zpřístupnit instalační úsek pro vkládání vzorků pomocí odnímatelného víka. Styčné plochy mezi víkem a trubicí musí být pečlivě opracovány a k vyloučení úzkých štěrbin se doporučuje použít těsnicí materiál (vazelínu). Zadní deska držáku vzorku musí být tuhá a musí být k trubici pevně přimontována, neboť slouží při mnoha měřeních jako tuhé ukončení. Doporučuje se kovová deska tloušťky alespoň 2 cm. [8]



Obr. 11: Detail držáku vzorku

Pohyblivým mikrofonem se snímá obrazec stojaté vlny v impedanční trubicí ke zjištění poloh tlakových minim a amplitud (nebo hladin) akustického tlaku v maximech a minimech stojaté vlny. Mikrofon se pohybuje buď vně impedanční trubice, v tom případě je k němu upevněna sondážní trubka s otvorem pro snímání zvuku v impedanční trubicí nebo se přímo samotný mikrofon (pohyblivý) přemísťuje uvnitř impedanční trubice. Zmenšení průřezu impedanční trubice mikrofonem a/nebo podpěrkami a/nebo jinými součástmi nesmí překročit 5 % průřezu kdekoli ve zkušebním úseku.[8]

V našem případě jsme měli k dispozici trubkovou mikrofonní sondu. Trubka sondy musí být kovová s dostatečnou tloušťkou stěn, aby nedocházelo k pronikání zvukového pole do trubky jejími stěnami. Světlost trubky by měla být úměrná její délce; dlouhá trubka o malém průměru může mít příliš vysoký vnitřní útlum. Ve vodorovné impedanční trubicí musí být uprostřed vedená trubka sondy podepřena, aby nedocházelo k jejímu prohýbání, neboť by to mohlo vést

ke vzniku vyšších vlnových módů. Podpěrky se nesmí nacházet blízko otvoru pro snímání zvuku. [8]

Je třeba se vyvarovat mechanických styků mezi trubkou sondy a impedanční trubicí, které mohou do trubky přenášet vibrace, zvláště u otvoru, kterým trubka sondy ústí do impedanční trubice. U tohoto otvoru se doporučuje sondu podložit měkkým pěnovým materiálem. [8]



Obr. 12: Zvukový analyzátor Brüel & Kjaer type 2260 Investigator

Zařízení pro zpracování signálu se skládá ze zesilovače, filtru, měřidla akustického tlaku nebo hladiny akustického tlaku (vztažené k libovolnému, ale konstantnímu referenčnímu tlaku) Dynamický rozsah jednotky pro zpracování signálu by měl být větší než 60 dB. Chyby způsobené nelinearitou, chyby čtení, nestabilita a teplotní citlivost musí být menší než 0,2 dB. Zvukoměry třídy 0 tyto požadavky obvykle splňují. [8]

Dostatečné filtrování v mikrofonní řetězci musí zajistit, aby po umístění mikrofonu nebo sondy do tlakového maxima byly šum a obsah harmonických v signálu alespoň 50 dB pod jeho základním kmitočtem. [8]

Membránový reproduktor (nebo tlakový reproduktor pro vysoké kmitočty s vlnovodem jako přenosovým prvkem do impedanční trubice) představuje uzávěr impedanční trubice na opačném konci než držák vzorku. Plocha membrány reproduktoru (nebo ústí vlnovodu) musí pokrývat alespoň dvě třetiny průřezu impedanční trubice. Osa reproduktoru může být s osou trubice buď shodná, nebo od ní odkloněná, nebo přecházet do trubice kolenem a usnadnit tak zavedení trubkové sondy. [8]

V naší impedanční trubicí byl membránový reproduktor v ose trubice a osou reproduktoru také procházela hliníková trubková mikrofonní sonda. (reproduktor neměl vrchlík a trubice procházela otvorem uprostřed magnetického obvodu) [8]

Reproduktor musí být zabudován do zvukově izolované skříně, aby se zabránilo přímému přenosu zvuku do mikrofону. Mezi reproduktorovou skříní a impedanční trubici z jedné strany a koš reproduktoru z druhé strany (a raději také mezi impedanční trubici a přenosový prvek) se musí vložit pružné izolační těsnění, aby nedocházelo k buzení impedanční trubice zvukem šířeným konstrukcí. [8]



Obr. 13: měřič kmitočtu, Tesla, BM 640A a Sine Generátor Brüel & Kjaer Type 1024

Generátor signálu se skládá z generátoru sinusových kmitů s integrovaným výkonovým zesilovačem a čítačem kmitů.

Přesnost nastaveného kmitočtu musí být lepší než 2 %. Tato tolerance platí i pro kolísání kmitočtu během měření.

Jako generátor sinusových kmitů byl použit Brüel & Kjaer; Sine-Random Generator Type: 1024. Pro měření frekvence byl použit univerzální čítač Tesla BM 640A.

2.4 Vlastní měření

Vlastní měření probíhalo na VUT v Brně - Fakulta strojního inženýrství – ústav fyzikálního inženýrství, za pomoci RNDr. Anny Ryndové, Ph.D.

Zde jsme proměřili několik druhů polyuretanových pěn, (hořlavé a samozhášivé) každou v pěti různých provedeních. Bylo tedy nutné připravit dostatečné množství vzorků, jelikož měření probíhalo pro každé provedení pěny 3 až 6x a to jen ve větší trubici, další 2 měření následovaly pro vysoké frekvence.

Měření probíhalo tak, že předem připravený vzorek pěny byl umístěn do držáku a přišroubován ke konci impedanční trubice. Poté se nastavovaly jednotlivé frekvence na oscilátoru a mohlo být zahájeno hledání minim a maxim akustického tlaku posunem vozíku se sondou. To bylo

zjednodušeno použitím zvukoměru, který umožňoval analyzovat jednotlivé třetinooktávové pásma v reálném čase.

Z profilovaných provedení pěn byly připraveny vždy 3 vzorky pro měření v trubici o průměru 99mm, vždy dva symetrické a jeden náhodný, pro měření v menší trubici byly vzorky dva: jeden kopírující vrchol, druhý náhodný.



Obr. 14: Připravené vzorky – jehlany 7cm

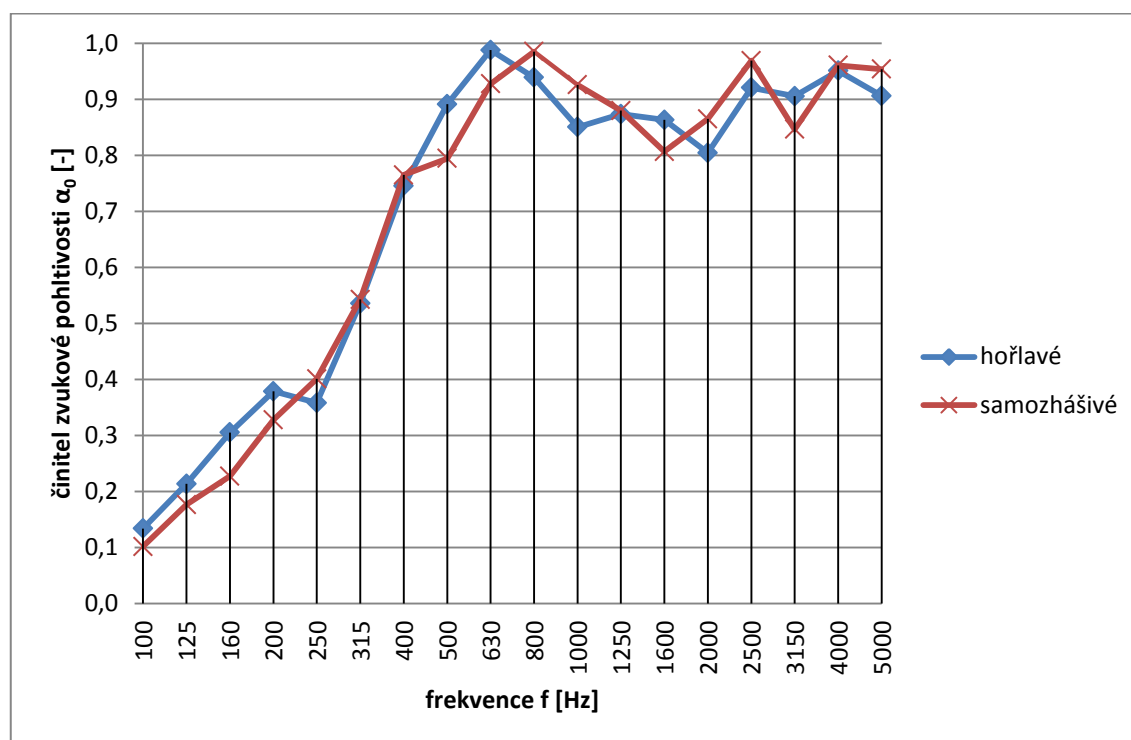
Před měřením byl každý vzorek pečlivě označen a do příslušných tabulek byly zaznamenávány změřené hodnoty. Ty se pro jednotlivá měření zprůměrovaly a poté se pomocí vzorce (18) vypočetl činitel zvukové absorpce α_0 .

2.5 Naměřené hodnoty

Z naměřených hodnot hladin intenzit L_{MIN} a L_{MAX} , kterých bylo více než 800. Bylo vypočítáno $\Delta L = L_{MAX} - L_{MIN}$ a z něj následně dle vzorce (18) činitel zvukové pohltivosti pro kolmý dopad vln α_0 .

Nejlépších hodnot činitele akustické pohltivosti dosáhly nejtlustší pěny, které byly k dispozici, viz následující tabulka a graf. Pro názornost jsem vybral nejlepší a nejhorší z měřených pěn.

2.5.1 Pěna – „panel“ tl. 9cm hořlavé + samozhášivé provedení



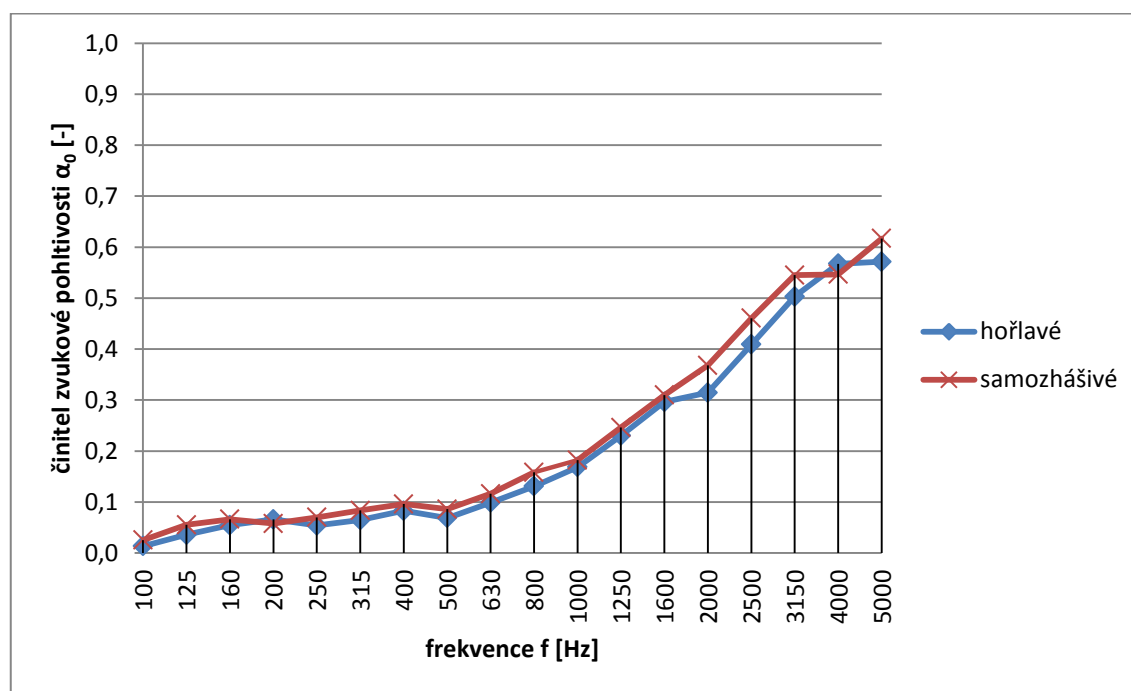
Obr. 15: Graf – průběh činitele akustické pohltivosti – panel tl. 9cm

Tab. II: naměřené hodnoty činitele akustické pohltivosti – panel tl. 9cm

kmitočet, [Hz]	hořlavé	samozhášivé
	α_0	
100	0,13	0,10
125	0,21	0,18
160	0,31	0,23
200	0,38	0,33
250	0,36	0,40
315	0,54	0,54
400	0,75	0,76
500	0,89	0,79
630	0,99	0,93
800	0,94	0,99
1000	0,85	0,93
1250	0,87	0,88
1600	0,86	0,81
2000	0,80	0,86
2500	0,92	0,97
3150	0,91	0,85
4000	0,95	0,96
5000	0,91	0,95

Tato pěna měla ze všech ostatních pěn nejlepší hodnoty činitele akustické pohltivosti. Lze ji využít všude, kde potřebujeme snížit hladinu hluku v širokém spektru frekvencí.

2.5.2 Pěna – „sinus“ tl. 3cm hořlavé + samozhášivé provedení



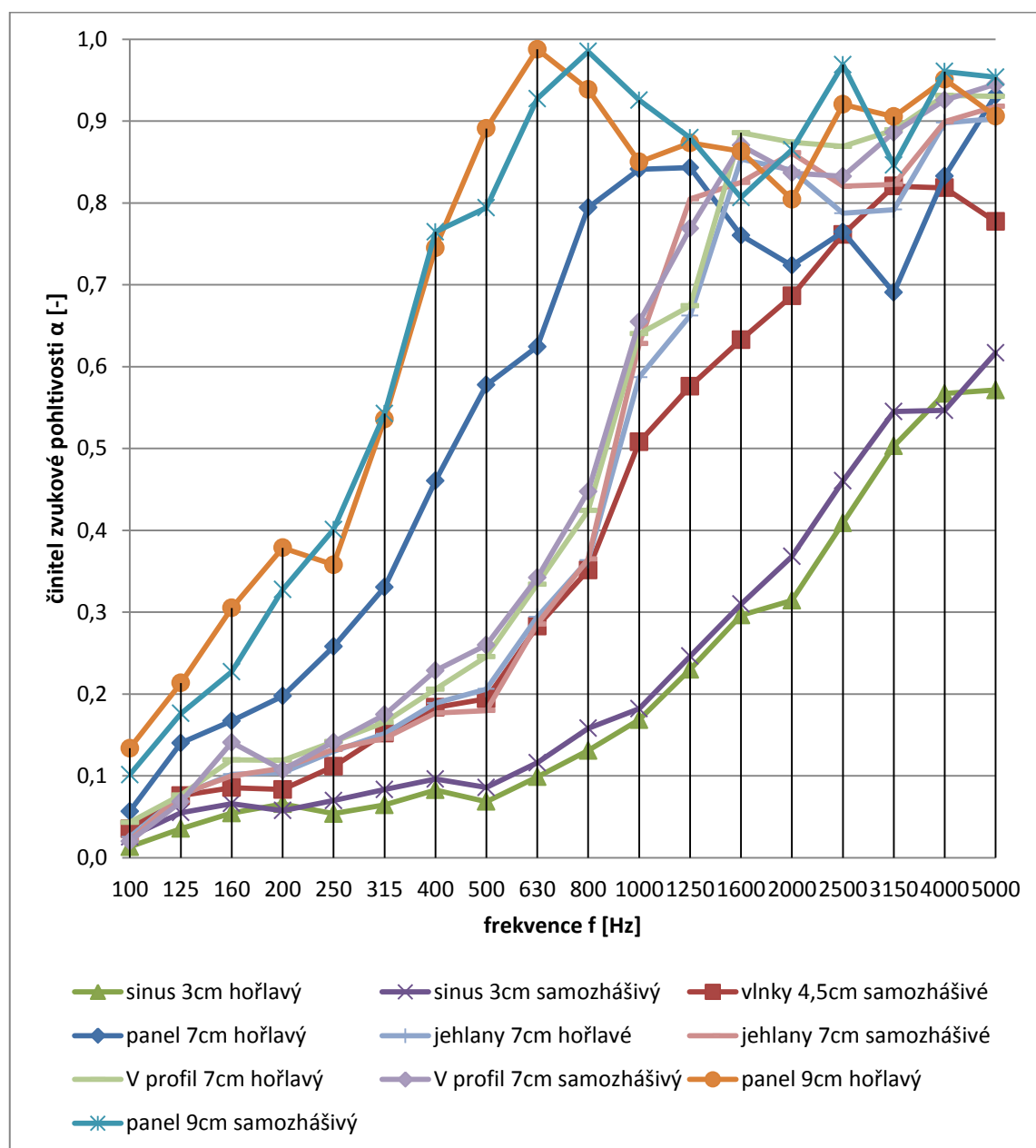
Obr. 16: Graf – průběh činitele akustické pohltivosti – „sinus“ tl. 3cm

Tab. III: naměřené hodnoty činitele akustické pohltivosti – „sinus“ tl. 3cm

kmitočet, [Hz]	samozhášivé	hořlavé
	α_0	
100	0,03	0,01
125	0,06	0,04
160	0,07	0,05
200	0,06	0,07
250	0,07	0,05
315	0,08	0,06
400	0,10	0,08
500	0,09	0,07
630	0,12	0,10
800	0,16	0,13
1000	0,18	0,17
1250	0,25	0,23
1600	0,31	0,30
2000	0,37	0,31
2500	0,46	0,41
3150	0,55	0,50
4000	0,55	0,57
5000	0,62	0,57

Tato pěna, resp. její provedení, mělo ze všech provedení nejhorší průběh α_0 . Byla zástupcem nejlevnějšího druhu, a hodí se pouze pro utlumení frekvencí nad 2kHz. Jedná se spíše o dekoraci, než o účinné tlumení.

2.5.3 Grafické srovnání všech měřených profilů



Obr. 17: Graf – srovnání všech měřených profilů

Z uvedeného grafu je zřejmé, že hlavní faktor, který nejvíce ovlivňuje velikost činitele akustické pohltivosti α_0 , je tloušťka panelu. Naopak tvar profilu tento činitel akustické pohltivosti ovlivňuje minimálně. Jednotlivé druhy akustických pěn jsou vyobrazeny v příloze.

Závěr

Z naměřených hodnot je patrné, že činitel akustické pohltivosti pro kolmý dopad zvukové vlny α_0 je velmi závislý na tloušťce akustické pěny. Toto zjištění vychází z teoretických poznatků, kde má pohltivý obklad největší účinek právě, pokud se nachází ve vzdálenosti $\frac{1}{4}$ vlnové délky kmitočtu, který chceme nejlépe tlumit od pevné překážky (stěna, strop). Toho můžeme docílit buď velkou tloušťkou této pěny, nebo umístění od zdi v určité vzdálenosti. Tím nejlevněji a poměrně jednoduše zvýšíme účinnost těchto absorbérů v oblasti středních a nižších kmitočtů. Měření závislosti se vzduchovým polštářem mezi pěnou a pevnou stěnou jsem bohužel neuskutečnil, jelikož možnosti měření byly časově omezené a měření bylo velmi časově náročné. Navíc by bylo problematické umisťovat takto široké vzorky do měřicí interferenční trubice.

Tyto problém při měření by řešilo měření činitele akustické pohltivosti v dozvukové místnosti dle normy ČSN EN ISO 354, kdy se umístí velká plocha (cca 12m²) akustické pěny na stěnu, popřípadě do konstrukce před ní a měří se doba dozvuku v místnosti bez tohoto obkladu a s ním. Z těchto dob se následně vypočte činitel akustické pohltivosti pro všesměrový dopad vln, který je v praxi více objektivní oproti specifickému kolmému dopadu vln.

Zajímavým zjištěním byla skutečnost, že pohltivost těchto pěn, jen minimálně závisí na profilu, ten je hlavně designovou záležitostí, a tedy bude záležet na preferencích investora.

V budoucnu bych chtěl zjistit, zda bude možné zajistit dozvukovou místnost, která by byla pro tyto měření vhodnější a analyzovat tyto pěny znovu a srovnat průběhy pohltivosti pro kolmý a všesměrový dopad.

Seznam použité literatury

- [1] SKOTNICOVÁ, Iveta. *Odhlučnění staveb*. Brno: ERA, 2006, 1. vyd. 134 s. ISBN 80-736-6070-9
- [2] Brüel & Kjaer, *Noise control*. Naerum: 1986, 156 s 2nd ed.. ISBN 87-873-5509-4.
- [3] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005, 281 s. ISBN 80-862-5331-7.
- [4] SCHAUER, Pavel. *Akustika: učební texty pro magisterské, bakalářské, distanční a doktorské studium*. Brno: CERM, 2002, 57 s. ISBN 80-214-2069-3.
- [5] MIŠÁK, Stanislav. Skriptum: *Technická diagnostika*. Ostrava 2007, 182 s.
- [6] WIKIPEDIA.ORG - vnímání zvuku [online]. [cit. 2013-21-01], dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk>
- [7] WIKIPEDIA.ORG - vnímání zvuku [online]. [cit. 2013-21-01], dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kladn%C3%AD_akustick%C3%A9_veli%C4%8Diny
- [8] ČSN ISO 10534-1. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny*.
- [9] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980, 244 s.

Seznam použitých obrázků

- Obr. 1. Sluchový orgán a jeho vnitřní uspořádání.[1]*
- Obr. 2. Rozsah slyšení u zdravého člověka v závislosti na hladině intenzity zvuku a kmitočtu.[1]*
- Obr. 3. Kolísání akustického tlaku okolo barometrického.*
- Obr. 4. Akustický výkon zdroje zvuku.[1]*
- Obr. 5. Kingsburyho křivky stejné hlasitosti[9]*
- Obr. 6. Akustická spektra zvuku.[1]*
- Obr. 7. Pohltivá, porézní akustická pěna*
- Obr. 8. Dekorativní děrované HDF desky. [online]. [2013-04-20]. Dostupné z:
http://www.rova.cz/derovane_desky/skupina-00240101.html*
- Obr. 9. Obrázec stojaté vlny ve zkušební trubici.[8]*
- Obr. 10. Impedanční trubice Brüel & Kjaer type 4002*
- Obr. 11. Detail držáku vzorku*
- Obr. 12. Zvukový analyzátor Brüel & Kjaer type 2260 Investigator*
- Obr. 13. Měřič kmitočtu, Tesla, BM 640A a Sine Generátor Brüel & Kjaer Type 1024*
- Obr. 14. Připravené vzorky – „jehlany“ 7cm*
- Obr. 15. Graf – průběh činitele akustické pohltivosti – „panel“ tl. 9cm*
- Obr. 16. Graf – průběh činitele akustické pohltivosti – „sinus“ tl. 3cm*
- Obr. 17. Graf – srovnání všech měřených profilů*

Seznam tabulek

Tab. I. Příklady hlukových hladin vyskytující se v běžném životě.

Tab. II. Naměřené hodnoty činitele akustické pohltivosti – panel tl. 9cm

Tab. II. Naměřené hodnoty činitele akustické pohltivosti – „sinus“ tl. 3cm

Seznam příloh:

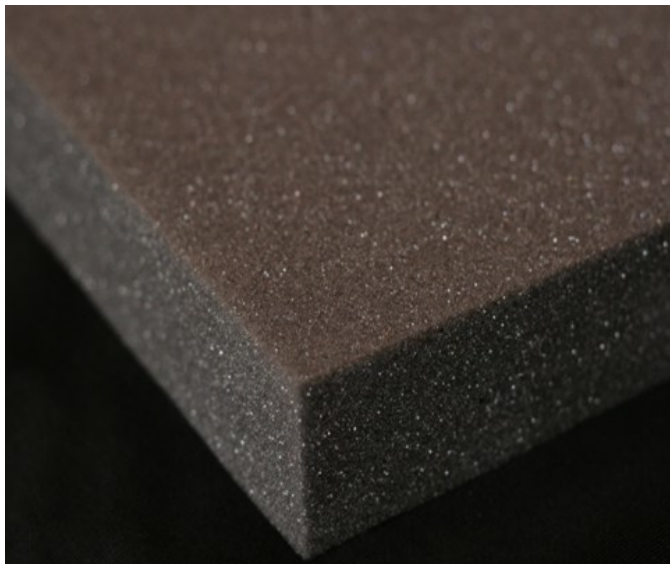
	Počet stran
Příloha A – fotografie jednotlivých akustických pěn	2

Přílohy

Příloha A

Fotografie jednotlivých akustických pěn.

Pozn.: samozhášivé a hořlavé provedení jsou vizuálně totožné



Obr. I: „panel“ 7, 9cm



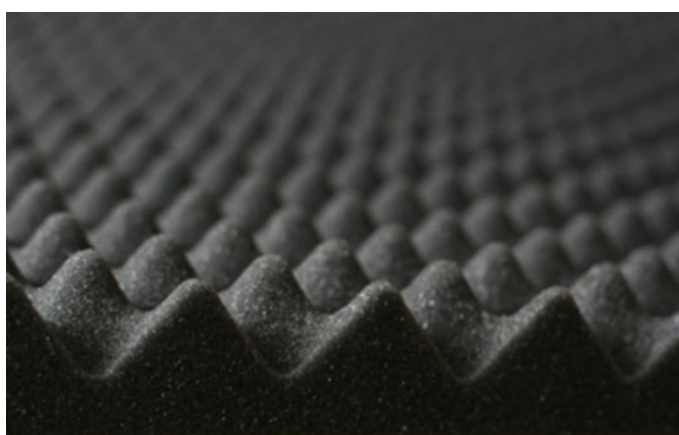
Obr. II: „jehlany“ 7cm



Obr. III: „V profil“ 7cm



Obr. IV: „sinus“ 3cm



Obr. V: „vlnky“ 4,5cm